中国生态农业学报 2017 年 2 月 第 25 卷 第 2 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Feb. 2017, 25(2): 258−266

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160720

杨永辉, 武继承, 张洁梅, 潘晓莹, 王越, 何方. 耕作方式对土壤水分入渗、有机碳含量及土壤结构的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(2): 258−266

Yang Y H, Wu J C, Zhang J M, Pan X Y, Wang Y, He F. Effect of tillage method on soil water infiltration, organic carbon content and structure[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(2): 258−266

耕作方式对土壤水分入渗、有机碳含量及土壤结构的影响*

杨永辉[1,2], 武继承[1,2], 张洁梅[1,2], 潘晓莹[1,2], 王 越[1,2], 何 方[1,2]

(1. 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所 郑州 450002; 2. 农业部作物高效用水科学观测实验站 原阳 453514)

摘 要: 为探明不同耕作方式对土壤剖面结构、水分入渗过程等的作用机理, 采集田间长期定位耕作措施(常规耕作、免耕、深松)试验中的原状土柱(0~100 cm)及 0~10 cm、10~20 cm、…、90~100 cm 环刀样、原状土及混合土样, 通过室内模拟试验进行了 0~100 cm 土层土壤入渗过程和饱和导水率的测定, 分析了不同土层的土壤有机碳含量、土壤结构特征及相互关系。结果表明: 从土柱顶部开始供水(恒定水头)到水分全部入渗到土柱底部的时间为: 常规耕作>免耕>深松; 土柱土壤入渗速率和累积入渗量为: 深松>免耕>常规耕作; 土柱累积蒸发量为: 常规耕作>免耕>深松。土壤的饱和导水率表现为: 0~10 cm 和 50~60 cm 土层, 免耕>深松>常规耕作; 20~50 cm 和 60~100 cm 土层, 深松>免耕>常规耕作。随土层的加深, >0.25 mm 水稳性团聚体含量和土壤有机碳含量均表现为先增加(10~20 cm)再降低的趋势。在 0~40 cm 土层和 80~100 cm 土层, 均以深松处理>0.25 mm 水稳性团聚体含量最高。在 60 cm 以上土层, 土壤有机碳含量表现为: 免耕>深松>常规耕作, 而 60 cm 土层以下土壤有机碳显著降低, 均低于 4 g·kg^{-1}, 且在 70 cm 以下土层, 常规耕作>免耕>深松。综上, 耕作措施能够改变土壤有机碳含量, 改善土壤结构, 促进土壤蓄水保墒; 深松更利于水分就地入渗, 而免耕则更利于有机碳的提升和水分的储存, 其作用深度在 0~60 cm 土层。

关键词: 常规耕作; 深松; 免耕; 水分入渗; 土壤有机碳; 土壤结构
中图分类号: S152 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)02-0258-09

Effect of tillage method on soil water infiltration, organic carbon content and structure*

YANG Yonghui[1,2], WU Jicheng[1,2], ZHANG Jiemei[1,2], PAN Xiaoying[1,2], WANG Yue[1,2], HE Fang[1,2]

(1. Institute of Plant Nutrition & Resource Environment, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China; 2. Yuanyang Experimental Station of Crop Water Use, Ministry of Agriculture, Yuanyang 453514, China)

Abstract: Long-term tillage can greatly influence the physical properties of soil profile. For example, subsoiling and no-tillage can increase soil organic matter content, improve soil structure, increase the stability of soil structure and thereby improve soil moisture environment. In addition, no-tillage and subsoiling rotation can significantly improve soil water storage. Most

* 国家自然科学基金项目(U1404404)、河南省农业科学院优秀青年科技基金(2016YQ12)和国家高技术研究发展计划(863 计划)课题(2013AA102904)资助
杨永辉, 主要研究方向为土壤生态与节水农业。E-mail: yangyongh@mails.gucas.ac.cn
收稿日期: 2016-08-15 接受日期: 2016-10-14

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (U1404404), the Excellent Youth Science and Technology Fund of Henan Academy of Agricultural Sciences (2016YQ12) and the National High-tech R&D Program of China (863 Program) (2013AA102904).
Corresponding author, YANG Yonghui, E-mail: yangyongh@mails.gucas.ac.cn
Received Aug. 15, 2016; accepted Oct. 14, 2016

reported studies were on no-tillage with mulching or subsoiling with mulching or no-tillage and subsoiling rotation. And the investigated soil profiles were usually focused on the ploughed layer. However, the effect of long-term subsoiling or no-tillage without mulching on the physical properties, infiltration processes, organic carbon distribution and structure of soil, especially for the deep soil has been rarely reported. Thus the objective of the study was to explore the effects of long-term no-tillage, subsoiling and conventional tillage, all without mulching, on the structure and water infiltration processes of the soil profile. An undisturbed 0–100 cm soil column, and the ring-cut samples of undisturbed soil and mixed soil samples of the 0–10 cm, 10–20 cm, ···, 90–100 cm layers were collected in a long-term field experiment to determine the soil infiltration processes, saturated hydraulic conductivity, soil organic carbon content and soil structure. The results showed that the time for water infiltrating from the surface to the bottom of soil column under conventional tillage was longest among all treatments. The orders of permeability rate and cumulative infiltration of soil column were as follow: subsoiling > no-tillage > tillage. Then time for cumulative evaporation of the soil column arranged from max to min was from conventional tillage to no-tillage and then to subsoiling. Also the order of saturated hydraulic conductivity in the 0–10 cm and 50–60 cm soil layers was no-tillage > subsoiling > conventional tillage, and that in 20–50 cm and 60–100 cm soil layers was subsoiling > no-tillage > conventional tillage. With the increasing depth of soil, the content of > 0.25 mm water-stable aggregates and soil organic carbon initially increased (10–20 cm layer) and then gradually decreased. In the 0–40 cm and 80–100 cm soil layer, the content of > 0.25 mm water-stable aggregates under subsoiling was highest. The order of soil organic carbon content in the 0–60 cm soil layer was no-tillage > subsoiling > conventional tillage. While soil organic carbon below the 60 cm layer of all the treatments was lower than 4.0 $g \cdot kg^{-1}$, and followed the order of conventional tillage > no-tillage > subsoiling below the 70 cm soil layer. It was therefore concluded that reasonable tillage improved soil organic carbon content and soil structure, and then promoted soil water conservation. Subsoiling was more favorable to soil water infiltration and no-tillage more conducive for organic carbon and water storage, especially in the 0–60 cm soil layer.
Keywords: Conventional tillage; Subsoiling; No-tillage; Soil water infiltration; Soil organic carbon; Soil structure

免耕、深松与表土作业等土壤耕作措施可改善土壤结构[1-2]，降低坡耕旱地水土流失，增强土壤微生物活性，降低作物干旱胁迫的伤害[3]。同时，可提高土壤肥力[4]和土壤孔隙度，降低土壤容重，促进作物生长[5]。秸秆还田+免耕可增加表层土壤的通气孔隙，降低其无效孔隙，改善土壤结构，提高土壤持水性能，增加土壤水分库容[6]。少耕或免耕有利于接纳降雨和水分储存，促进作物产量与水分利用率的提高[7-9]。免耕+秸秆覆盖能有效保持土壤剖面水分含量，减少土壤蒸发量[10]，提高土壤的饱和导水率[11]。于同艳等[12]研究表明，免耕虽不利于水分入渗，但可有效保持土壤中的水分。杨永辉等[13]研究表明，连续 2 年免耕可改善土壤结构，降低土壤容重，改善土壤孔隙状况。深松能够打破土壤犁底层，改善土壤孔隙，促进土壤蓄水保墒，有利于作物根系利用深层土壤水[14]，且深松能够显著提高>0.25 mm 水稳性团聚体含量，有效提高土壤的储水量[15]。深松+地面覆盖可改善土壤团粒结构，提高土壤剖面的水分状况[16]。免耕与深松轮作能显著提高土体的蓄水量[17-18]。以往的研究多偏重于免耕覆盖或深松覆盖或二者轮作，且研究深度为犁底层以上的土壤，对于深层土壤的影响，以及长期单独深松或免耕对土壤剖面物理特征、入渗过程及有机碳分布特征及其作用深度等影响如何目前尚鲜见报道，需要深入研究，以阐明长期深松和免耕对土壤的作用机理。

笔者对长期深松和免耕条件下 0~100 cm 土层的土壤结构、水分入渗过程与蒸发特征、有机碳分布及相互关系进行了研究，为阐明在小麦(*Triticum aestivum*)、玉米(*Zea mays*)轮作过程中，长期进行深松和免耕对土壤剖面物理特征的改善及其作用机理提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

试验设置在河南省禹州试验基地(113°03′~113°39′E, 33°59′~34°24′N，海拔116.1 m)进行，多年平均降水量674.9 mm，其中60%以上降雨集中在夏季；土壤类型为褐土。研究区地势平坦，耕层土壤有机质含量12.3 $g \cdot kg^{-1}$、全氮含量0.80 $g \cdot kg^{-1}$、水解氮含量47.82 $mg \cdot kg^{-1}$、速效磷含量6.66 $mg \cdot kg^{-1}$、速效钾含量114.8 $mg \cdot kg^{-1}$。研究区为小麦-玉米轮作区。2014年度小麦品种为‘周麦22’，玉米品种为‘郑单958’。土壤机械组成为：砂粒(2~0.02 mm)占59.1%，粉粒(0.02~0.002 mm)占22.5%，黏粒(<0.002 mm)占18.4%。

1.2　试验设计

长期定位试验于 2006 年 10 月中旬小麦播种时开始，耕作措施在每年小麦播种时实施，玉米均为免耕播种。试验共设置 3 个处理：常规耕作(耕作深度为 15 cm)、免耕、深松(深度 30 cm)，试验小区未

进行秸秆还田。肥料采用 $N_{25}P_{15}K_{15}$ 复合型肥料，在小麦播种时一次性底施。在小麦播种前将肥料均匀撒于小区内，然后进行常规耕作和深松；免耕的施肥方式为小麦、玉米播种后点施。

于 2014 年玉米收获后(10 月 12 日)从定位试验每个处理的 3 个重复小区中间位置采用原状土柱采集器采集 0~100 cm 原状土柱，测定土壤入渗过程。即将有机玻璃管放入采集器中，用铁锤于采集器上方进行竖直敲击，待采集器进入土中深度 110 cm 时，将采集器拔出，并从采集器的下方取出采集器内的有机玻璃管。同时在采集原状土柱的旁边挖剖面，并分层采集(0~10 cm、10~20 cm、⋯、90~100 cm)环刀样(测定饱和导水率)、原状土(测定团粒结构)及混合土壤样品(测定土壤有机碳含量)。每个处理取 3 个重复带回室内进行分析。

1.3 测定项目与方法

1)土壤饱和导水率采用恒定水头法[19]测定，水稳性团聚体采用维诺夫法[20](湿筛法)分级测定，土壤有机碳采用改进的外加热重铬酸钾氧化法[21]测定。

2)土壤入渗过程测定。将田间采集的原状土柱(土柱长 110 cm，直径 20 cm，壁厚 1 cm)带到室内，放置，待土柱含水量为 8%~10%左右(表 1)，进行土柱水分入渗过程的观测。观测前，对土柱进行称重并记录其初始重量。在土柱(透明有机玻璃)侧面，平行于土柱方向粘贴带有刻度的坐标纸，从上至下标注土柱的深度，精确度为 1 mm。采用马氏瓶在土柱上方(土柱上方留有 10 cm 高度空间，以接纳供水)进行恒定水头的供水。调节马氏瓶高度，土柱上方的水层厚度控制在 5 cm 左右。从土柱供水时开始计时，并观测土柱剖面的水分入渗距离，每个土柱上观测 3 组数据(土柱侧面等间距竖直粘贴 3 条坐标纸，以获得 3 组数据，计算其平均值作为观测值，最小刻度为 mm)，每个处理 3 个土柱共 9 组数据计算平均值。开始观测时每分钟观测 1 次土柱水分入渗距离，同时观测马氏瓶中水层下降高度。待入渗距离推进缓慢时，延长观测记录数据时间。待水分入渗至土柱底层时，测量渗流出来的水分，当渗流水量恒定时(土柱含水量达到饱和，见表 1)，停止对土柱进行供水，并用胶带封住土柱底部，防止水分从土柱底部流出。观测结束后计算土柱累积入渗量、入渗速率。并采用精确度为 1 g 的电子天平对土柱进行称重，获得土柱饱和后的总重量。每隔 1 d 对土柱称重 1 次，观测其累计蒸发量，观测前后土柱含水量见表 1。

表 1 不同土柱初始含水量、饱和含水量及蒸发试验结束后的含水量

Table 1 Initial water content, saturated water content and water content after the end of evaporation experiment %

处理 Treatment	初始含水量 Initial water content	饱和含水量 Saturated water content	蒸发试验结束后含水量 Water content after experiment
常规耕作 Conventional tillage	8.5	26.5	12.3
免耕 No tillage	9.8	29.8	18.6
深松 Subsoiling	9.1	31.1	17.5

土柱入渗速率计算方法如下：

$$V=\frac{10\times Q_n}{t_n\times S}\times 60 \quad (1)$$

式中：V 为渗透速率，mm·min^{-1}；Q_n 为 n 次马氏瓶中进入土柱的水量，mL，即 cm^3；t_n 为每次渗透所间隔时间，min；S 为土柱横截面积，cm^2；10 为由 cm 换算成 mm 所乘倍数；60 为将渗透速率(V)单位 mm·min^{-1} 转换为 mm·h^{-1}。

1.4 数据处理

不同结果数值均为 3 次重复的算术平均值，且所得数据采用 Microsoft Excel 及 SPSS 软件进行处理。

2 结果与分析

2.1 长期不同耕作措施下水分入渗规律分析

2.1.1 水分运移规律分析

不同耕作措施对水分在土壤剖面中的运移规律各异(图1)。由于3个处理的土柱初始含水量较低(表1)，水分入渗较为迅速，3种耕作方式下，在很短时间内到达35 cm处，其中以深松处理最快。之后土壤

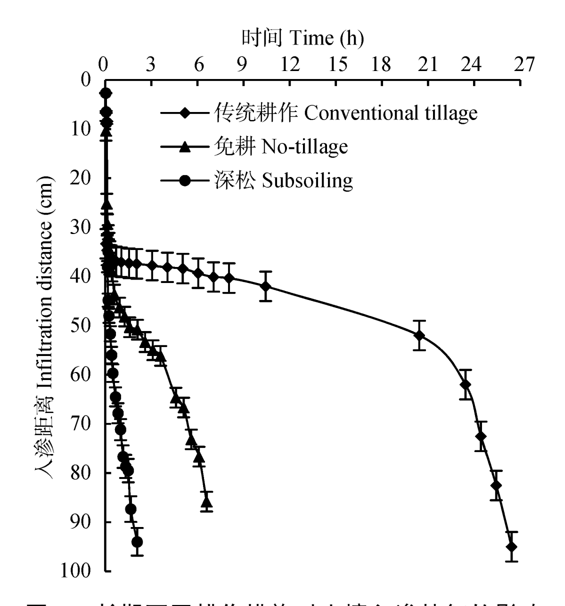


图 1 长期不同耕作措施对土壤入渗特征的影响

Fig. 1 Soil water infiltration characteristics under different long-term tillage measures

水分在土壤剖面上的入渗湿润峰行进减缓，且各土柱之间差异显著(P<0.01)，常规耕作处理到达相同距离的时间明显增加。而深松处理的水分运移仍较快，在不到3 h入渗到土柱底部；免耕处理水分运移到底部的时间是深松处理的2倍，常规耕作则超过24 h。说明深松打破了犁底层，使得土壤上下层更加通透(运移曲线上下平直)，更利于水分就地入渗；而常规耕作因为犁底层的阻隔，入渗能力明显降低；免耕虽也受到犁底层的影响，但由于其改善了表层土壤结构，进而入渗能力大于常规耕作。

2.1.2　累计入渗量分析

不同耕作措施土壤的初始入渗量基本相当，但随时间的推移，差异逐渐增大(图2)，且达极显著水平(P<0.01)。在土壤水分进入土壤3 h后，深松处理的土柱土壤到达饱和。常规耕作处理达到土壤饱和含水量的时间远大于其他处理，且其累计入渗量均小于其他处理。在相同时间内，累计入渗量大小为：深松>免耕>常规耕作(P<0.01)。说明深松后土壤蓄水容量显著提高，免耕的扩蓄增容效果也十分明显，分别较常规耕作提高27.3%和22.8%。

2.1.3　入渗速率分析

随时间的推移，土壤入渗速率逐渐降低。在整个入渗过程中，以深松处理的入渗速率最高，其次为免耕处理，常规耕作处理最低(P<0.05)，尤其在0~2.0 h间差异较大(P<0.01)(图3)。随时间的推移，各处理的入渗速率降低幅度逐渐减小，最终趋于恒定值，且深松与免耕仍高于常规耕作(P<0.05)。

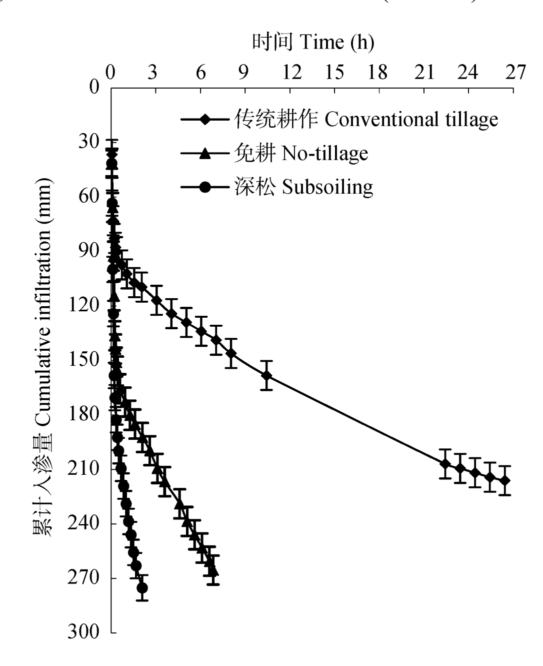


图 2　长期不同耕作措施对土壤累计入渗量的影响

Fig. 2　Soil cumulative infiltrations under different long-term tillage measures

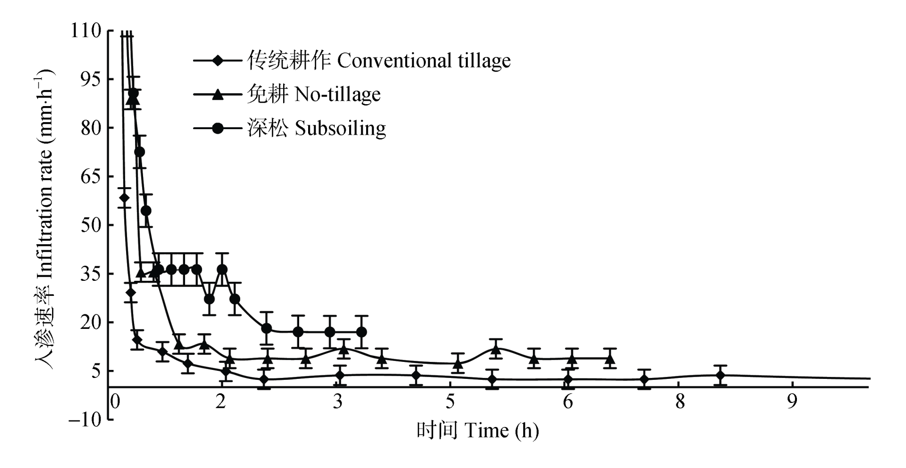


图 3　长期不同耕作措施对土壤入渗速率的影响

Fig. 3　Soil infiltration rates under different long-term tillage measures

2.2　累计蒸发量分析

随时间的推移，不同耕作处理的土壤累计蒸发量逐渐增大，且差异显著(图4)(P<0.01)。虽然常规耕作处理饱和时的含水率低于其他处理(表1)，但其初始及随后的蒸发量仍明显高于其他处理(P<0.01)。而免耕处理的蒸发量均显著低于其他处理(P<0.01)，其次为深松处理。说明实施深松和免耕耕作能够有效减少土壤的无效蒸发量。

2.3　不同土壤剖面饱和导水率差异分析

从图5中可知，20~30 cm土层的土壤饱和导水率最低，而10~20 cm土层最高(免耕处理除外)，随土层的加深，土壤饱和导水率趋于平缓。在0~10 cm土层，土壤饱和导水率表现为：免耕>深松>常规耕作(P<0.05)；在10~20 cm土层，深松处理明显高于其他处理(P<0.05)，这可能是深松后作物根系和蚯蚓活动频繁所致；在20~30 cm土层，各处理之间差异较小

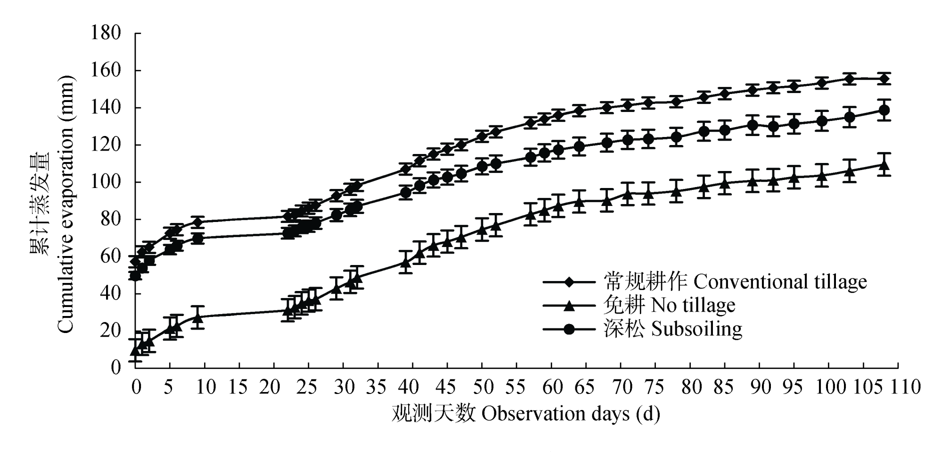


图 4　长期不同耕作措施对土壤蒸发过程的影响

Fig. 4　Soil evaporations under different long-term tillage measures

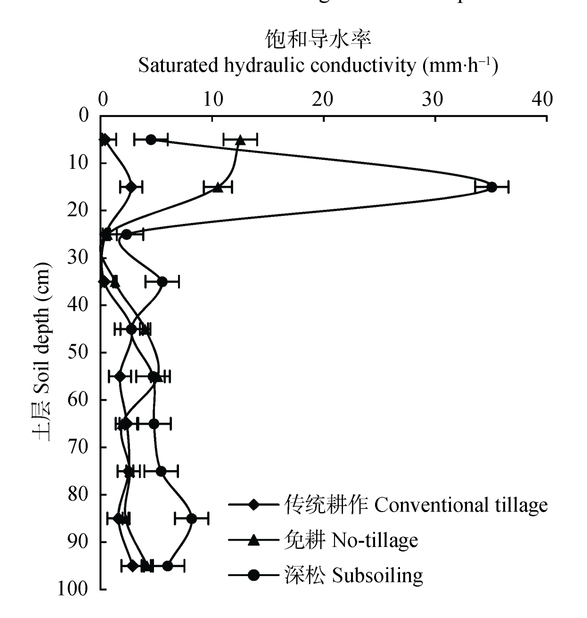


图 5　长期不同耕作措施对剖面土壤饱和导水率的影响

Fig. 5　Soil saturated hydraulic conductivities under different long-term tillage measures

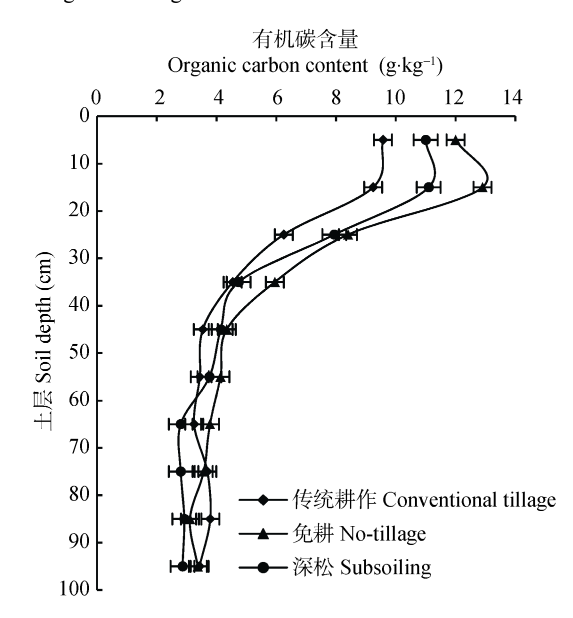


图 6　长期不同耕作措施对 0~100 cm 土层有机碳含量的影响

Fig. 6　Distribution characteristics of soil organic carbon in 0–100 cm soil layer under different long-term tillage measures

(P>0.05)，但仍以深松处理的饱和导水率最高；30~40 cm土层，各处理的土壤饱和导水率均增大，其中仍以深松处理最高，其次为免耕处理，常规耕作最低(P<0.05)。随土层的进一步加深，各处理的土壤饱和导水率趋于稳定，但整体来看，60 cm以下土层，免耕和常规耕作处理土壤饱和导水率较低，而深松处理土壤饱和导水率较高(P<0.05)。说明经过长期免耕和深松措施后，土壤剖面导水性能提高，尤其是20~30 cm以上土层效果更为显著，深松处理效果最佳。

2.4　不同耕作措施 0~100 cm 土层土壤有机碳分布特征

图 6 显示，不同耕作处理土壤有机碳含量在 40 cm 以上土层含量丰富，特别是 20 cm 以上的表层，40~70 cm 为含量过渡层，70 cm 以下为稳定层，总体随深度增加而衰减。在 60 cm 以上土层，均以免耕处理的土壤有机碳含量最高，其次为深松处理，常规耕作最低。而70~100 cm土层土壤有机碳变化较平缓，其有机碳含量为2~4 g·kg^{-1}。在80~100 cm土层，常规耕作处理的土壤有机碳均高于免耕和深松处理。说明经过长期免耕和深松促进了根系的生长和土壤生物的活动，土体有机碳得到改善的作用深度达60 cm以上。

2.5　不同耕作措施 0~100 cm 土层>0.25 mm 水稳性团聚体含量分析

>0.25 mm水稳性团聚体含量表征了土壤结构的稳定性。从图7可知，随土层的加深，>0.25 mm水稳性团聚体含量表现为先增加再显著降低的趋势。在0~10 cm和10~20 cm土层，>0.25 mm水稳性团聚体含量表现为：深松>免耕>常规耕作(P<0.05)。在0~40 cm和80~100 cm土层，均以深松处理>0.25 mm水稳性团聚体含量最高(P<0.05)。常规耕作处理除70~90 cm

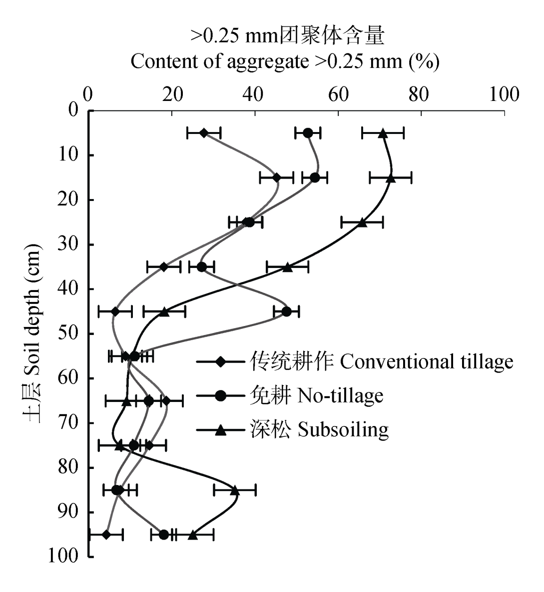


图 7　长期不同耕作措施对 0~100 cm 土层>0.25 mm 团聚体含量分布特征的影响

Fig. 7　Distribution characteristics of > 0.25 mm aggregate content in 0–100 cm soil layer under different long-term tillage measures

土层>0.25 mm 水稳性团聚体含量较高外，其他土层均最低。说明不同耕作措施改善了土壤剖面的团粒结构，提高了土壤结构的稳定性，尤其是 60 cm 以上土层。

2.6　>0.25 mm 水稳性团聚体含量、有机碳含量及饱和导水率相关性分析

>0.25 mm水稳性团聚体含量与土壤有机碳含量及土壤饱和导水率、土壤有机碳含量与土壤饱和导水率均表现为二次曲线关系(图 8)，且相关性均为极显著水平(P<0.01)。随土壤有机碳含量的增加，>0.25 mm 水稳性团聚体含量增加，土壤饱和导水率则表现为先降低再增加的趋势；随着>0.25 mm 水稳性团聚体含量增加到一定阀值(占总团聚体 30%)后继续增加，饱和导水率呈逐渐增加趋势。说明合理的耕作措施能够提高土壤中的有机碳，从而改善土壤结构，促进了土壤渗透能力的提高。

3　结论与讨论

深松、免耕可促进土壤有机质含量提高，改善土壤结构[22,24-25]，提高土壤结构的稳定性，改善土壤的水分环境[26]。进行长期深松和免耕会对剖面土壤的物理性质产生重要影响。本研究发现，在 35 cm 以上土层，水分运移较快，而以深松处理最快。但在 35 cm 以下，常规耕作处理水分运移速度明显减缓，深松处理水分运移较快。最终水分从土柱顶部入渗到底层的时间为：常规耕作>免耕>深松。在 0~2.0 h 时间段各处理的入渗速率差异较大，且以深松处理

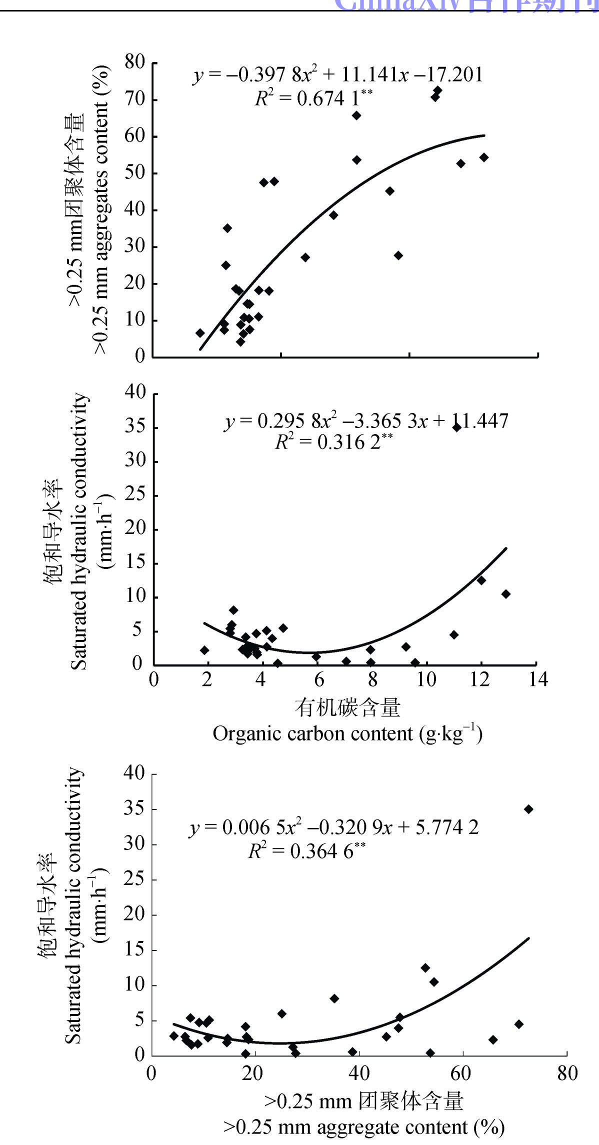


图 8　>0.25 mm 团聚体含量、饱和导水率及土壤有机碳相关性分析

Fig. 8　Correlation analysis between >0.25 mm soil aggregate content, saturated hydraulic conductivity and soil organic carbon content

最大，其次为免耕处理，常规耕作处理最低。随时间的推移，各处理的入渗速率逐渐降低，并趋于恒定，且仍以深松处理最高，其次为免耕处理。土壤饱和导水率反映了不同土层之间土壤结构的差异，而水分在土壤中的蓄存能力反映了不同措施对土壤结构的改善能力。以往的研究多偏重于耕层，对于土壤剖面不同土层而言，本研究发现，在 0~10 cm 和 50~60 cm 土层，免耕处理更利于土壤饱和导水率的提高，其次为深松处理，常规耕作处理最低；而在 10~50 cm 和 60~100 cm 土层，深松处理最高。说明深松打破了犁底层，改善了土壤孔隙状况[14]，增加了土壤的通透性[27]，促进了水分就地入渗，并向更深土层的运移[28]，提高土体的含水量[16]。而免耕条件下形成的良好土体结构，使其有效毛细管增多，且孔

管连续不间断，从而有利于水分的快速移动[29]，改善土体的入渗能力。这与高建华等[30]和于同艳等[12]研究结果相反，而与 Dao[31]和 Hati 等[32]研究结果一致，这可能与免耕时间[33]、土壤类型、种植制度等有关，需要进一步研究。此外，实施免耕和深松能够提高土壤的累积入渗量，增加土壤水分库容量，且降低了土壤的无效蒸发，各处理中，深松更利于水分入渗，而免耕更利于水分的保持。而有研究表明[18]，深松 1 年后进行免耕也能促进土壤蓄水保墒，而在长期深松后进行免耕的结果如何，需要进一步研究。

土壤入渗过程及蓄水能力与土壤结构[34]和有机质含量[35]紧密相关，可通过提高土壤有机质来改善土壤结构，进而调节水分在土壤中的转化、保持与供应，从而提高土壤的生产与生态功能。本研究发现，土壤有机碳含量随土层的加深而先增加(10~20 cm)再降低，到 70 cm 以下土层土壤有机碳趋于稳定。在 60 cm 土层以上，均以免耕处理的土壤有机碳含量最高，其次为深松处理，常规耕作处理最低。说明长期免耕和深松有利于水分的保持，促进了作物根系的生长和土壤生物的活动，而作物根系残留物或根系分泌物和土壤生物粪便又促进了土壤有机碳含量提高，改善了土壤结构。因此，>0.25 mm 水稳性团聚体含量随土层的加深也表现为先增加(10~20 cm)再降低的趋势。除 60~80 cm 土层外，均以深松处理>0.25 mm 水稳性团聚体含量最高，其次为免耕处理，特别在 60 cm 以上土层，效果更为显著。陈强等[36]的研究也得到了相同结论，而高建华等[30]研究表明免耕对土壤结构的改良并不明显，这可能与耕作时间或土壤类型有关，需要进一步研究。此外，相关研究仅基于表层土壤，而对于深层土壤的影响研究涉及较少。

综上，合理的长期耕作措施能够提高土壤剖面中的有机碳含量，从而改善土体土壤结构，促进土体土壤渗透能力和蓄水保墒能力的提高。而深松更利于水分就地入渗，免耕更利于有机碳的提升和水分的储存。但本研究为实行长期定位试验 8 年后的结果，而对于更长年限的免耕、深松或持续免耕后进行深松及持续深松后进行免耕等对土壤剖面物理特性的影响差异及程度如何，有待下一步研究。

参考文献 References

[1] Martínez E, Fuentes J P, Silva P, et al. Soil physical properties and wheat root growth as affected by no-tillage and conventional tillage systems in a Mediterranean environment of Chile[J]. Soil and Tillage Research, 2008, 99(2): 232–244

[2] 雷金银, 吴发起, 王健, 等. 保护性耕作对土壤物理特性及玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 40–45
Lei J Y, Wu F Q, Wang J, et al. Effects of conservation tillage on soil physical properties and corn yield[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(10): 40–45

[3] 周静, 张仁陟. 不同耕作措施下春小麦应对干旱胁迫的生理响应[J]. 干旱区研究, 2010, 27(1): 39–43
Zhou J, Zhang R Z. Physiological response of spring wheat to drought stress under different cultivation measures[J]. Arid Zone Research, 2010, 27(1): 39–43

[4] 康红, 朱保安, 洪利辉, 等. 免耕覆盖对旱地土壤肥力和小麦产量的影响[J]. 陕西农业科学, 2001(9): 1–3
Kang H, Zhu B A, Hong L H, et al. Effects of zero-tillage and mulching on the soil fertility and wheat yield in the arid land[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2001(9): 1–3

[5] Acharya C L, Sharma P D. Tillage and mulch effects on soil physical environment, root growth, nutrient uptake and yield of maize and wheat on an alfisol in north-west India[J]. Soil and Tillage Research, 1994, 32(4): 291–302

[6] 刘定辉, 陈尚洪, 舒丽, 等. 四川盆地丘陵区秸秆还田少免耕对土壤水分特征的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(6): 119–122
Liu D H, Chen S H, Shu L, et al. Impact of straw mulching and no-tillage on soil water characteristics of paddy field in hilly area of Sichuan basin[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(6): 119–122

[7] 姚宇卿, 吕军杰, 王育红, 等. 保持耕作对豫西旱地冬小麦产量及效益的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(4): 42–44
Yao Y Q, Lv J J, Wang Y H, et al. Effect of conservation tillage on yield and benefit of winter wheat in dry-land in west Henan[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2002, 20(4): 42–44

[8] 江晓东, 李增嘉, 侯连涛, 等. 少免耕对灌溉农田冬小麦/夏玉米作物水、肥利用的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7): 20–24
Jiang X D, Li Z J, Hou L T, et al. Impacts of minimum tillage and no-tillage systems on soil NO_3^--N content and water use efficiency of winter wheat/summer corn cultivation[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(7): 20–24

[9] 毛红玲, 李军, 贾志宽, 等. 旱作麦田保护性耕作蓄水保墒和增产增收效应[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 44–51
Mao H L, Li J, Jia Z K, et al. Soil water conservation effect, yield and income increments of conservation tillage measures on dryland wheat field[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8): 44–51

[10] 武海霞, 耿宝江. 保护性耕作对黑土区坡耕地土壤水分的影响[J]. 人民长江, 2011, 42(9): 105–107
Wu H X, Geng B J. Effects of conservation tillage on soil moisture content of slope land in black soil area[J]. Yangtze River, 2011, 42(9): 105–107

[11] 蔡立群, 罗珠珠, 张仁陟, 等. 不同耕作措施对旱地农田土壤水分保持及入渗性能的影响研究[J]. 中国沙漠, 2012, 32(5): 1362–1368

Cai L Q, Luo Z Z, Zhang R Z, et al. Effect of different tillage methods on soil water retention and infiltration capability of rainfed field[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(5): 1362–1368

[12] 于同艳, 张兴. 耕作措施对黑土农田耕层水分的影响[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2007, 29(3): 121–124
Yu T Y, Zhang X. Effects of different soil tillage systems on soil water in the black farmland[J]. Journal of Southwest Agricultural University: Natural Science Edition, 2007, 29(3): 121–124

[13] 杨永辉, 武继承, 毛永萍, 等. 利用计算机断层扫描技术研究土壤改良措施下土壤孔隙[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 99–108
Yang Y H, Wu J C, Mao Y P, et al. Using computed tomography scanning to study soil pores under different soil structure improvement measures[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(23): 99–108

[14] 吕巨智, 程伟东, 钟昌松, 等. 不同耕作方式对土壤物理性状及玉米产量的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(30): 38–43
Lü J Z, Cheng W D, Zhong C S, et al. Effects of different cultivation methods on the soil physical properties and yield of maize[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(30): 38–43

[15] 刘绪军, 荣建东. 深松耕法对土壤结构性能的影响[J]. 水土保持应用技术, 2009(1): 9–11
Liu X J, Rong J D. Effect of deep tillage on soil structure and properties[J]. Technology of Soil and Water Conservation, 2009(1): 9–11

[16] 李荣, 侯贤清. 深松条件下不同地表覆盖对马铃薯产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 115–123
Li R, Hou X Q. Effects of different ground surface mulch under subsoiling on potato yield and water use efficiency[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 115–123

[17] 侯贤清, 贾志宽, 韩清芳, 等. 不同轮耕模式对旱地土壤结构及入渗蓄水特性的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 85–94
Hou X Q, Jia Z K, Han Q F, et al. Effects of different rotational tillage patterns on soil structure, infiltration and water storage characteristics in dryland[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(5): 85–94

[18] 孙贵臣, 冯瑞云, 陈凌, 等. 深松免耕种植对土壤环境及玉米产量的影响[J]. 作物杂志, 2014(4): 129–132
Sun G C, Feng R Y, Chen L, et al. Effect of deep loosening and zero tillage on soil environment and maize growth[J]. Crops, 2014(4): 129–132

[19] 欧少亭. 林业管理常用标准及政策法规汇编——森林土壤渗透性测定[M]. 长春: 吉林电子出版社, 2002
Ou S T. Compilation of Commonly Used Standards, Policies and Regulations for Forestry Management: Determination of Forest Soil Permeability[M]. Changchun: Jilin Electronic Publishing House, 2002

[20] 中国科学院土壤研究所. 土壤物理性质测定方法[M]. 北京: 科学出版社, 1978: 328–331
Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Method for Determination of Soil Physical Properties[M]. Beijing: Science Press, 1978: 328–331

[21] 林心雄, 文启孝, 徐宁. 广州地区土壤中植物残体的分解速率[J]. 土壤学报, 1985, 22(1): 47–55
Lin X X, Wen Q X, Xu N. Study on decomposition of plant residues in soils of Guangzhou and Wuxi[J]. Acta Pedologica Sinica, 1985, 22(1): 47–55

[22] Chan K Y, Heenan D P, Oates A. Soil carbon fractions and relationship to soil quality under different tillage and stubble management[J]. Soil and Tillage Research, 2002, 63(3/4): 133–139

[23] 李琳, 李素娟, 张海林, 等. 保护性耕作下土壤碳库管理指数的研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3): 106–109
Li L, Li S J, Zhang H L, et al. Study on soil C pool management index of conversation tillage[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(3): 106–109

[24] 王新建, 张仁陟, 毕冬梅, 等. 保护性耕作对土壤有机碳组分的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 115–121
Wang X J, Zhang R Z, Bi D M, et al. Effects of conservation tillage on soil organic carbon fractions[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(2): 115–121

[25] 刘中良, 宇万太. 土壤团聚体中有机碳研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 447–455
Liu Z L, Yu W T. Review of researches on soil aggregate and soil organic carbon[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(2): 447–455

[26] 杨永辉. 土壤结构特征对坡地雨水转化的影响[D]. 咸阳: 中国科学院水土保持与生态环境研究中心, 2006
Yang Y H. Effects of soil structure characteristics on the transformation of slope land[D]. Xianyang: Center for Soil and Water Conservation and Ecological Environment Research, Chinese Academy of Sciences, 2006

[27] Wang X B, Cai D X, Hoogmoed W B, et al. Developments in conservation tillage in rainfed regions of North China[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 93(2): 239–250

[28] 黄健, 王爱文, 张艳茹, 等. 玉米宽窄行轮换种植、条带深松、留高茬新耕作制度对土壤性状的影响[J]. 土壤通报, 2002, 33(3): 168–171
Huang J, Wang A W, Zhang Y R, et al. Effects of new cropping system on soil properties of wide and narrow spacing maize rotation planting, striply deep loosening and leaving high stubble on the ground[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2002, 33(3): 168–171

[29] Shaver T M, Peterson G A, Ahuja L R, et al. Surface soil physical properties after twelve years of dryland no-till management[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(4): 1296–1303

[30] 高建华, 张承中. 不同保护性耕作措施对黄土高原旱作农田土壤物理结构的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(4): 192–196
Gao J H, Zhang C Z. The effects of different conservation tillage on soil physical structures of dry farmland in the Loess Plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010,

28(4): 192–196

[31] Dao T H. Tillage and winter wheat residue management effects on water infiltration and storage[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(6): 1586–1595

[32] Hati K M, Chaudhary R S, Mandal K G, et al. Effects of tillage, residue and fertilizer nitrogen on crop yields, and soil physical properties under soybean-wheat rotation in Vertisols of central India[J]. Agricultural Research, 2015, 4(1): 48–56

[33] 罗珠珠, 黄高宝, 张国盛. 保护性耕作对黄土高原旱地表土容重和水分入渗的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(4): 7–11
Luo Z Z, Huang G B, Zhang G S. Effects of conservation tillage on bulk density and water infiltration of surface soil in semi-arid area of west Loess Plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(4): 7–11

[34] 杨永辉, 赵世伟, 雷廷武, 等. 宁南黄土丘陵区不同植被下土壤入渗性能[J]. 应用生态学报, 2008, 19(5): 1040–1045
Yang Y H, Zhao S W, Lei T W, et al. Soil infiltration capacity under different vegetations in southern Ningxia loess hilly region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(5): 1040–1045

[35] 宋日, 刘利, 吴春胜, 等. 东北松嫩草原土壤开垦对有机质含量及土壤结构的影响[J]. 中国草地学报, 2009, 31(4): 91–95
Song R, Liu L, Wu C S, et al. Reclamation on organic matter content and structural properties in steppe soil of northeast Songnen Plain[J]. Chinese Journal of Grassland, 2009, 31(4): 91–95

[36] 陈强, Kravchenko Y S, 陈渊, 等. 少免耕土壤结构与导水能力的季节变化及其水保效果[J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 11–21
Chen Q, Kravchenko Y S, Chen Y, et al. Seasonal variations of soil structures and hydraulic conductivities and their effects on soil and water conservation under no-tillage and reduced tillage[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(1): 11–21